

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИ БЕЗОПРАВОЧНОМ ВОЛОЧЕНИИ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБ С ПОДПОРОМ

© 2012 Б.В. Каргин, В.Р. Каргин, Т.С. Пастушенко

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

Поступила в редакцию 29.12.2011

Проведено теоретическое исследование процесса безоправочного волочения тонкостенных труб с осевым подпором на входе в волоку. Приведена полная система уравнений, позволяющая найти с помощью компьютера напряженно-деформированное состояние, необходимое для инженерного выбора параметров волочения и инструмента.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, безоправочное волочение, тонкостенная труба.

При безоправочном волочении тонкостенных труб с подпором, помимо тянущей силы P_v , прикладываемой к переднему концу трубы в направлении, совпадающем с направлением волочения, прилагается еще дополнительная сила Q со стороны входа в волоку, направление которой совпадает с направлением волочения, рис. 1. Этот процесс применяется на трубоволочильных станах новейшей конструкции [1].

Целью данной работы является постановка и реализация задачи определения параметров напряженно-деформированного состояния при безоправочном волочении тонкостенных труб с подпором.

При решении поставленной задачи использованы гипотезы и допущения, обычные для процесса волочения тонкостенных труб [2]: деформация трубы принимается как осесимметричная и безмоментная, напряженное состояние всех точек трубы плоское, меридиональное σ_l и окружное σ_θ напряжения – главные напряжения, напряжение трения на контактной поверхности находили по закону Кулона.

Деформируемую трубную заготовку в плавно сужающемся канале волоки разделяли на три участка: конический l_k , радиусный l_p и калибрующий $l_{\text{кал}}$ (см. рис. 1). Параметры напряженно-деформированного состояния на этих участках устанавливали в конечном числе точек. Для этого трубная заготовка, срединный радиус которой R_0 , а толщина стенки S_0 , разбивается на N узких

кольцевых элементов одинаковой длины l_0 . В процессе волочения исходные элементы при протягивании через профилированный канал волоки под действием осевых сил P_v и Q деформируются и занимают положения, определяемые радиусами $R_1, R_2, \dots, R_i, \dots, R_N$. Соответственно длина образующих и толщины стенок элементов при $R_1, R_2, \dots, R_i, \dots, R_N$ принимают значения $l_1, l_2, \dots, l_i, \dots, l_N$ и $S_1, S_2, \dots, S_i, \dots, S_N$. Число элементов должно быть достаточным для того, чтобы в пределах каждого элемента процесс деформирования считался монотонным.

В качестве параметров деформированного состояния, описывающих бесконечно малые приращения деформаций, для i -го элемента использовали логарифмические деформации:

$$(\Delta \varepsilon_\theta)_i = \ln \frac{R_i}{R_{i-1}}, (\Delta \varepsilon_r)_i = \ln \frac{S_i}{S_{i-1}}, (\Delta \varepsilon_l)_i = \ln \frac{l_i}{l_{i-1}}, \quad (1)$$

связанные между собой условием постоянства объема:

$$(\Delta \varepsilon_\theta)_i + (\Delta \varepsilon_r)_i + (\Delta \varepsilon_l)_i = 0, \quad (2)$$

и интенсивность бесконечно малых приращений деформаций:

$$(\Delta \varepsilon)_i = \sqrt{\frac{4}{3} [(\Delta \varepsilon_\theta)_i^2 + (\Delta \varepsilon_r)_i^2 + (\Delta \varepsilon_l)_i^2]}. \quad (3)$$

Конечные деформации $\varepsilon_l, \varepsilon_\theta, \varepsilon_r$ для каждого i -го элемента находят, суммируя бесконечно малые приращения деформации i -го элемента и конечные деформации $(i-1)$ -го элемента, т. е.

$$\begin{aligned} (\varepsilon_l)_i &= (\varepsilon_l)_{i-1} + (\Delta \varepsilon_l)_i; \\ (\varepsilon_\theta)_i &= (\varepsilon_\theta)_{i-1} + (\Delta \varepsilon_\theta)_i; \\ (\varepsilon_r)_i &= (\varepsilon_r)_{i-1} + (\Delta \varepsilon_r)_i; \\ (\varepsilon)_i &= (\varepsilon)_{i-1} + (\Delta \varepsilon)_i. \end{aligned} \quad (4)$$

Каргин Борис Владимирович, СГАУ, кандидат технических наук, доцент кафедры обработки металлов давлением, заместитель декана факультета.

E-mail: bkargin@mail.ru

Каргин Владимир Родионович, СГАУ, доктор технических наук, профессор кафедры обработки металлов давлением.

E-mail: vrkargin@mail.ru

Пастушенко Татьяна Сергеевна, кандидат технических наук, ассистент кафедры механической обработки материалов. E-mail: tpast@newmail.ru

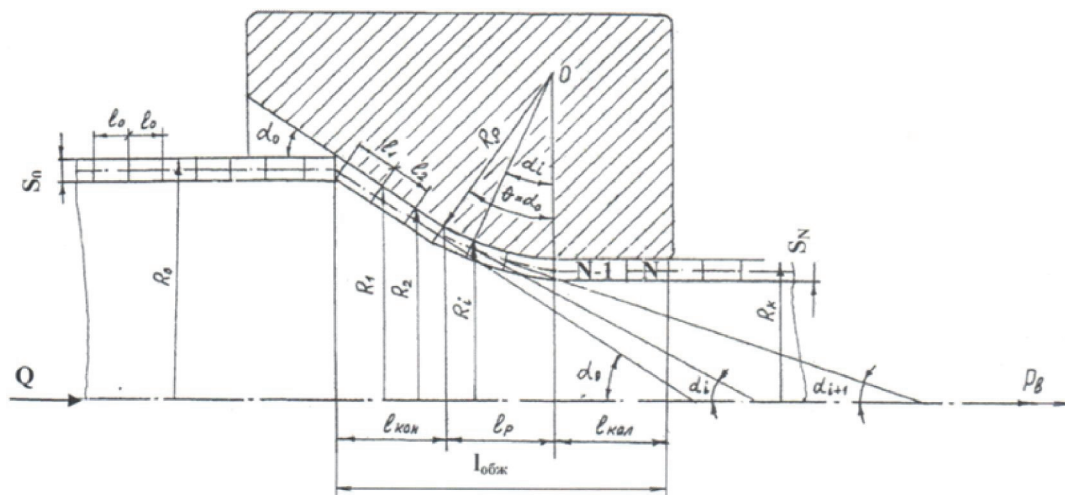


Рис. 1. Волочение тонкостенной трубы

Компоненты напряженного состояния σ_1 и σ_θ определяют по известным компонентам деформированного состояния из уравнений теории пластического течения:

$$(\sigma_1)_i = -\frac{2}{3} \left(\frac{\sigma_i}{\Delta \varepsilon_i} \right) [(\Delta \varepsilon_\theta)_i + 2(\Delta \varepsilon_r)_i], \quad (5)$$

$$(\sigma_\theta)_i = \frac{2}{3} \left(\frac{\sigma_i}{\Delta \varepsilon_i} \right) [(\Delta \varepsilon_\theta)_i - (\Delta \varepsilon_r)_i],$$

где σ_i – интенсивность напряжений.

Интенсивность напряжений для i -го элемента находят из закона упрочнения металла заготовки, например, заданного в виде степенного ряда:

$$(\sigma_i)_i = \sigma_{T0} + A(\varepsilon_i)_{i3}^n, \quad (6)$$

где σ_T – предел текучести материала заготовки при входе в волоку,

A и n – коэффициенты аппроксимации диаграммы упрочнения.

Контактное давление P_i для i -го элемента можно получить из уравнения равновесия сил в направлении нормали к меридиану:

$$P_i = -S_i \left[\frac{(\sigma_1)_i}{R_i} + \left(\frac{\sigma_\theta}{R_\theta} \right)_i \right]. \quad (7)$$

Здесь R_i – радиус кривизны меридиального сечения;

R_θ – радиус кривизны сечения трубы конической поверхностью, перпендикулярной дуге меридиана.

На коническом участке принимаем, что $R_1 = \infty$, $(R_\theta)_i = R_i / \cos \alpha$, на радиусном R_i определяется геометрией радиусного перехода $(R_{ii})_i = R_i / \cos \theta$ (R_i – радиус окружности в сечении плоскостью перпендикулярной оси волочения; α , θ – углы между касательной к меридиану и осью волочения на коническом и радиусном участках соответственно).

На цилиндрическом участке считаем, что $R_1 = \infty$, $R_\theta = R_k$, где R_k – конечный радиус готовой трубы.

Уравнения равновесия элементов в направлении касательной к меридиану на коническом, радиусном и цилиндрическом участках канала волоки соответственно следующие:

$$\frac{d}{dR} (\sigma_1 RS) - \sigma_\theta S - \frac{\mu PR}{\sin \alpha} = 0,$$

$$\frac{d}{d\theta} (\sigma_1 RS) - R_i (\sigma_\theta S \sin \theta + \mu PR) = 0,$$

$$\frac{d\sigma_1}{dl} = \frac{\mu}{S} P.$$

Здесь μ – коэффициент внешнего трения. Представив эти формулы в конечных разностях и проинтегрировав методом трапеций [3], окончательно будем иметь:

на коническом участке

$$(\sigma_1 RS)_i - (\sigma_1 RS)_{i-1} = \frac{R_i + R_{i+1}}{2} \left[\left(\sigma_\theta S + \frac{\mu PR}{\sin \alpha} \right)_i + \left(\sigma_\theta S + \frac{\mu PR}{\sin \alpha} \right)_{i-1} \right], \quad (8)$$

на радиусном участке

$$(\sigma_1 RS)_i - (\sigma_1 RS)_{i-1} = \frac{\theta_i + \theta_{i-1}}{2} [(\sigma_\theta S \sin \theta + \mu PR)_i + (\sigma_\theta S \sin \theta + \mu PR)_{i-1}], \quad (9)$$

на цилиндрическом участке

$$(\sigma_1)_i - (\sigma_1)_{i-1} = \frac{l_i + l_{i-1}}{2} \mu \left[\left(\frac{P}{S} \right)_i + \left(\frac{P}{S} \right)_{i-1} \right]. \quad (10)$$

Таким образом, для любого элемента в канале волоки получаем замкнутую систему уравне-

ний для определения неизвестных $R_i, S_i, l_i, \varepsilon_{\theta i}, \varepsilon_{\pi i}, (\varepsilon_i)_i, (\sigma_i)_i, \sigma_i, \sigma_{\theta i}, P_i$. Для конического участка система включает уравнения (1) – (8), для радиусного – (1) – (7) и (9), на цилиндрическом участке используется только уравнение (10). В связи с тем, что деформация трубной заготовки является осесимметричной, параметры напряженно-деформированного состояния – только функция одной независимой переменной либо радиуса R , либо угла θ . Поэтому решение системы (1) – (9) в представленной последовательности сводится к решению трансцендентного уравнения (8) или (9) в функции независимой переменной.

Процесс вычисления параметров напряженно-деформированного состояния начинается на коническом участке со значения $i=1$. При этом для кольцевого элемента, расположенного до входа в очаг деформации, считаются известными все параметры напряженно-деформированного состояния. Для ненагруженного элемента обычно принимают $\varepsilon_1 = \varepsilon_r = \varepsilon_{\theta} = 0$, $\sigma_{\theta} = P = 0$, $\sigma_1 = Q/F_0$, где F_0 – площадь поперечного сечения заготовки на входе в волоку.

Так как геометрия первого элемента в процессе волочения неизвестна, то предполагаем, что изменение длины образующей l_1 будет происходить на отрезке $[0,95 l_0, 1,05 l_0]$. Это дает воз-

можность при численном решении на ЭВМ приведенной системы уравнений воспользоваться методом дихотомии [3]. Расчет действительного значения R_1 , определяющего точную геометрию первого элемента, проводится с точностью Δ_1 : $|R^{k+1}_1 - R^k_1| \leq \Delta_1$, где $k+1$ и k – номера приближений для независимой переменной. Другие параметры элемента находят из геометрических соотношений $S_i = (S_0 l_0 R_0) / (R_i l_i)$, $l_i = (R_0 - R_i) / \sin \alpha$. По точным значениям параметров геометрии первого элемента по соотношению (1), (3) – (5) определяют истинные значения деформаций и напряжений (рис. 2), критерием правильности их выбора служит обращение уравнения равновесия (8) в тождество. Расчет параметров напряженно-деформированного состояния для последующих элементов 2, 3, ..., i , ..., N проводится в аналогичной последовательности за исключением того, что на радиусном участке в качестве независимой переменной используется угол θ , а на цилиндрическом участке находят только σ_1 .

После того, как будет определено напряженно-деформированное состояние во всех элементах канала волоки, процесс вычислений не заканчивается. Для достижения заданной точности расчета усилия волочения D_2 нужно вести те же самые вычисления, увеличив число ранее заданных кольцевых элементов. Требуемая точность Δ_2 достигается при выполнении неравенства $(P^{m+1}_B - P^m_B) \leq \Delta_2$, где $m+1$ и m – номера приближений по усилию волочения, $P_B = \sigma_{1N} (\pi (2R_K - S_N) S_N)$, рис. 3.

Результаты расчета параметров напряженно-деформированного состояния на ЭВМ при волочении медных труб из сплава МЗ с различным подпором представлены на рис. 4. В процессе вычислений принято $R_0 = 16$ мм, $S_0 = 1$ мм, $l_0 = 0,5$ мм, $l_{\text{кал}} = 5$ мм, $R_c = 1$ мм, $\alpha = 12^\circ$, $R_K = 13$ мм, $\sigma_1 = 75 + 58 \varepsilon_L^{0,42}$, $\mu = 0,12$, $\Delta_1 = 10^{-4}$ мм, $\Delta_2 = 50$ Н.

Из анализа графиков следует, что по мере продвижения металла трубы вдоль волочильного канала длиной l_0 меридиональное напряжение возрастает, достигая своего максимального значения на выходе из канала волоки. Меридио-

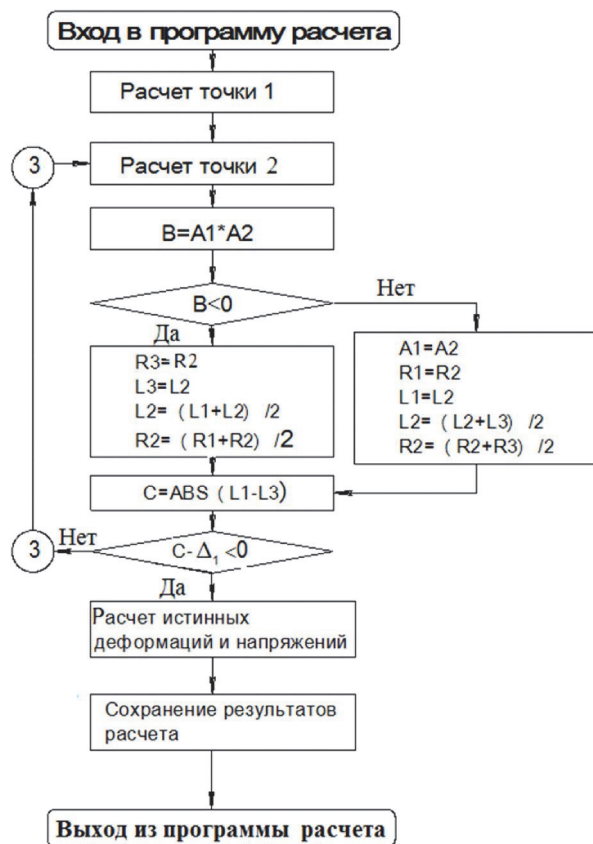


Рис. 2. Алгоритм расчета параметров напряженно-деформированного состояния в кольцевом элементе

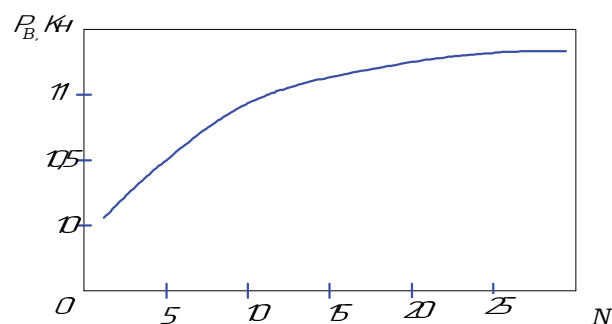


Рис. 3. Влияние числа кольцевых элементов N на изменение усилия волочения P_B

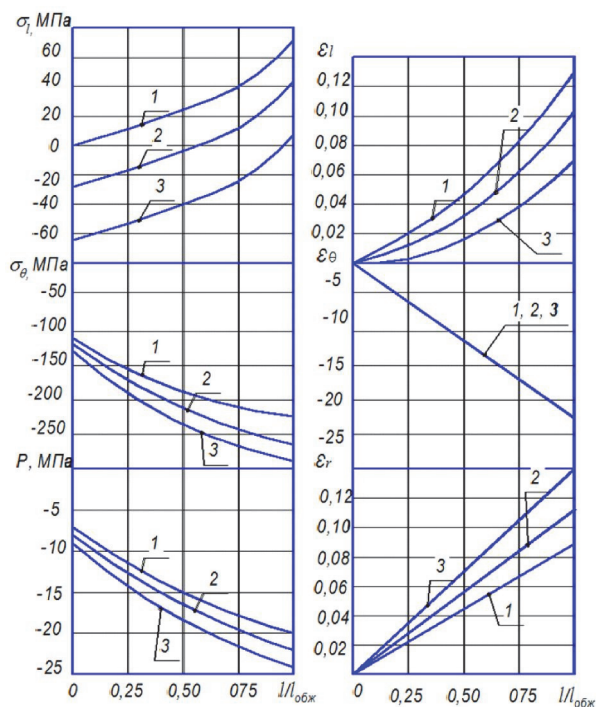


Рис. 4. Распределение параметров напряженно-деформированного состояния по длине канала волокна:
1 – $q=0$ МПа, 2 – $q=30$ МПа, 3 – $q=70$ МПа

нальное напряжение больше при волочении тонкостенной трубы без подпора. Чем больше подпор, тем меньше u_r и соответственно больше степень деформации заготовки за проход. При под-

поре $q=Q/F_0=70$ МПа, осевое напряжение близко к нулю. По этой схеме реализуется процесс осадки трубы вдавливанием в волоку.

Окружные сжимающие напряжения и контактное давление P распределены по длине канала волокна по нелинейному закону, возрастают по абсолютной величине к выходу из канала волокна. Подпор со стороны входа заготовки в волоку вызывает увеличение σ_θ и P . Чем больше подпор, тем выше рост σ_θ и P .

Величина тангенциальных деформаций не зависит от величины подпора. Подпор существенно влияет на величину меридиональных и радиальных деформаций ε_l и ε_r . Чем больше подпор, тем больше утолщаются стенки трубы, а длина полученной трубы меньше, чем при традиционном волочении без осевого подпора.

Использование предлагаемой методики позволяет моделировать реальные процессы безоправочного волочения тонкостенных труб на непрерывных станах и может быть полезным при создании САПР технологических процессов для выбора оптимальных режимов волочения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перцов З.И. Волочильные станы. М.: Металлургия, 1986, 208 с.
2. Савин Г.А. Волочение труб. М.: Металлургия 1993, 336 с.
3. Калиткин Н.Н. Численные методы. М.: Наука, 1978, 364 с.

THIN – WALLED TUBES AN AXIAL PRESSURIZATION AT THE PORTAGE

© 2012 B.V. Kargin, V.R. Kargin, T.S. Pastushenko

Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolev
(National Research University)

There was conducted a theoretical study of sink drawing of thin – walled tubes with axial pressurization at the entrance to the portage. The complete system of equations is given helping of find stress – strain state required for an engineering drawing of the options and tools by means of computer.

Key words: stress – strain state, sink drawing, thin – walled tubes.

Boris Kargin, Candidate of Technics, Associate Professor at the Metal Forming Department, Deputy Dean. E-mail: bkargin@mail.ru

Vladimir Kargin, Doktor of Technics, Professor at the Metal Forming Department. E-mail: vrkargin@mail.ru

Tatiana Pastushenko, Candidate of Technics, Assistant Lecturer at the Machining Materials Department. E-mail: tpast@newmail.ru